RAPPORT DE L'UAT-R

relatif à

L'ÉVOLUTION DES COMMUNICATIONS PAR SATELLITE

référencé

Rapport UAT-R 006-0

JUILLET 2025

Table des matières

CHAMP D'APPLICATION DU RAPPORT *3*

RÉSUMÉ ANALYTIQUE *4*

1. CONTEXTE *5*

2. RÉSEAUX NON TERRESTRES *6*

1.1 Direct-to-Device 6

1.2 L'internet des objets (IdO) 7

1.3 VSAT mobile 9

1.4 Le satellite comme backhaul pour les réseaux 5G 10

1.5 Systèmes de collecte de données NGSO (DCS) 11

1.6 Satellite Défini par logiciel 11

3. SATELLITES MULTI-ORBITES *12*

4. INNOVATION DANS LE SEGMENT TERRESTRE *13*

5. LIAISONS INTER-SATELLITES *14*

6. ENTRETIEN EN ORBITE ET PROLONGATION DE LA DURÉE DE VIE *15*

7. INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE *15*

8. CONCLUSION *16*

9. RÉFÉRENCES *17*

10. ABBREVIATIONS *18*

CHAMP D'APPLICATION DU RAPPORT

L'industrie des communications par satellite connaît une innovation et une croissance sans précédent grâce à de nouvelles technologies émergentes et en évolution, telles que les progrès des architectures multi-orbites, la connectivité directe avec les appareils et l'intégration de l'intelligence artificielle.

Ce rapport fournit une vue d'ensemble complète et une ressource accessible qui rend compte de ces développements. Il fournit une vue d'ensemble actualisée des dernières innovations en matière de technologie satellitaire et des informations sur les avancées technologiques, ce qui permet aux pays membres de l'UAT de rester à la pointe de la connaissance du secteur. Ceci est crucial dans un environnement en évolution rapide où rester informé peut faire la différence entre être à la pointe et être à la traîne.

En outre, le rapport souligne l'impact potentiel de ces technologies sur la transformation de la connectivité mondiale. Les communications par satellite jouant un rôle de plus en plus vital pour réduire la fracture numérique et permettre la connectivité dans toutes les régions, y compris les régions éloignées et mal desservies, il devient essentiel de comprendre tout le potentiel des technologies émergentes pour la planification stratégique et la prise de décision.

Alors que les pays africains envisagent des investissements futurs, des orientations de recherche et des initiatives de développement de produits, il est essentiel d'avoir une vision claire des tendances émergentes et de leur impact potentiel. Ce rapport constitue une ressource essentielle pour doter les décideurs politiques, les régulateurs et les acteurs de l'industrie des connaissances nécessaires pour naviguer dans l'avenir des technologies satellitaires couplées à leur intégration aux solutions terrestres, et pour guider les membres de l'UAT dans leurs processus de planification stratégique et de prise de décision.

En outre, le rapport explore les implications techniques, opérationnelles et économiques de ces technologies, en soulignant leur rôle dans l'élargissement de l'accès au haut débit, en permettant l'évolutivité de l'IdO, et en soutenant le backhaul du haut débit sans fil, y compris la 5G/IMT-2020 dans les zones reculées. En outre, le rapport aborde les défis réglementaires et de normalisation, offrant des perspectives pour guider les États membres de l'UAT dans la formulation de politiques visant à exploiter les technologies satellitaires pour le développement durable et la croissance numérique inclusive.

RÉSUMÉ ANALYTIQUE

L'industrie des communications par satellite est en train de subir un changement de paradigme, sous l'impulsion de solutions innovantes. Le développement de systèmes multi-orbites combine la large couverture des satellites GEO avec les avantages des constellations LEO et MEO en termes de faible latence, permettant ainsi la fourniture de services pour diverses applications.

La connectivité directe entre appareils (D2D), normalisée par les cadres RNT du 3GPP, permet aux appareils de communiquer directement avec les satellites, ce qui étend la couverture aux zones non desservies et mal desservies.

En outre, les progrès réalisés dans les segments terrestres, tels que les antennes à panneau plat et les protocoles interopérables, réduisent les coûts et améliorent les performances, ce qui rend les solutions satellitaires plus accessibles. L'intelligence artificielle et les liaisons inter satellites optimisent encore l'efficacité des réseaux satellitaires, tandis que l'entretien en orbite prolonge la durée de vie des satellites, réduisant ainsi les coûts d'exploitation.

Ce rapport montre comment ces nouvelles technologies satellitaires renforcent la connectivité mondiale, améliorent la capacité et répondent aux besoins croissants de divers utilisateurs, notamment les entreprises, les gouvernements et les particuliers. Le document sert de guide pour comprendre comment ces innovations rendent les communications par satellite plus polyvalentes, plus rentables et font partie intégrante de l'avenir de la connectivité mondiale.

Pour les États membres de l'UAT, ces technologies offrent des possibilités de transformation : la liaison terrestre par satellite peut accélérer les technologies sans fil, notamment le déploiement de la 5G dans les zones rurales, les réseaux IdO par satellite peuvent permettre un large éventail de cas d'utilisation, notamment la surveillance de l'environnement, l'agriculture intelligente et d'autres activités économiques, et les systèmes orbitaux hybrides peuvent renforcer la résilience face aux catastrophes.

Pour exploiter pleinement ce potentiel, il est recommandé aux États membres de l'UAT de développer et d'harmoniser de manière proactive des politiques et des réglementations qui, entre autres, facilitent les investissements dans les infrastructures satellitaires de nouvelle génération. Ce rapport souligne la nécessité pour les États membres de l'UAT et les autres parties prenantes d'adopter ces technologies afin de s'assurer qu'aucune communauté n'est laissée pour compte dans l'ère numérique.

1. CONTEXTE

La communication par satellite fait référence à l'utilisation de satellites en orbite pour transmettre des signaux et des données entre différents points de la Terre. Ces satellites sont principalement classés en fonction de leurs caractéristiques orbitales et de leur altitude. Les satellites en orbite géostationnaire (GEO), positionnés à environ 36 000 km au-dessus de l'équateur, restent fixes par rapport à la surface de la Terre, ce qui les rend idéaux pour les services de radiodiffusion et de communication fixe. Les satellites en orbite terrestre moyenne (MEO), qui opèrent entre 2 000 et 36 000 km, sont couramment utilisés pour les systèmes de navigation tels que GPS et Galileo. Les satellites en orbite basse (LEO), qui opèrent à des altitudes comprises entre 300 et 2 000 km, offrent une connectivité à faible latence et sont de plus en plus déployés pour fournir des services à large bande, l'observation de la terre et les services émergents D2D (Direct-to-Device). Les satellites à orbite hautement elliptique (HEO) fournissent une couverture spécialisée pour les régions de haute latitude où les satellites GEO sont moins efficaces.

Les services par satellite sont également regroupés en fonction de leur fonctionnalité : les services fixes par satellite (SFS), qui facilitent la communication entre les stations terrestres fixes (par exemple, les réseaux VSAT et la connectivité dorsale), les services de radiodiffusion par satellite (SRS), dédiés aux transmissions télévisuelles et radiophoniques pour les utilisateurs fixes ou mobiles, et les services mobiles par satellite (SMS), qui permettent la communication avec les utilisateurs mobiles sur terre, en mer ou dans les airs, en soutenant des services tels que les téléphones par satellite et les applications de sécurité maritime/aviation.

Les communications par satellite sont depuis longtemps à l'avant-garde de la connectivité mondiale, fournissant des services essentiels d'Internet, de télévision et de communication aux utilisateurs à la maison, au bureau et en déplacement. Les satellites soutiennent les prévisions météorologiques (en fournissant des informations en temps réel sur les schémas météorologiques et les systèmes de tempête), la télédétection (en collectant des données et en surveillant les événements à la surface de la Terre, tels que les phénomènes océaniques et côtiers et les incendies de forêt), la défense et la sécurité, et le PNT (positionnement, navigation et chronométrage). Les satellites constituent une bouée de sauvetage pour les régions éloignées, les zones sinistrées et les industries maritimes et aéronautiques.

Ces dernières années, les nouvelles technologies satellitaires ont permis d'élargir le choix en matière de connectivité et d'intensifier la concurrence dans le secteur des télécommunications, offrant ainsi de plus grandes possibilités aux utilisateurs. Ces technologies se caractérisent par des avancées significatives qui redessinent le paysage des communications par satellite et de la connectivité mondiale. Ces innovations se concentrent sur l'amélioration des capacités, la réduction des coûts et l'augmentation de l'accessibilité dans divers secteurs et permettent des solutions de connectivité évolutives, rentables et fiables qui peuvent répondre à une pluralité de besoins.

2. RÉSEAUX NON TERRESTRES

Les réseaux non terrestres (RNT) sont définis par le projet de partenariat de troisième génération (3GPP) comme des réseaux ou des segments de réseaux qui utilisent soit des systèmes d'aéronefs non hélitreuillés (UAS) tels que les HAPS (RNT aériens), soit des satellites (RNT satellitaires) pour assurer la continuité des services dans différents environnements et répondre aux besoins de connectivité dans les régions où les réseaux terrestres traditionnels ne sont pas disponibles ou ne sont pas fiables. La présente section se concentre sur les réseaux RNT par satellite et, tout au long du document, l'acronyme RNT désigne les réseaux RNT par satellite.

Lors de la phase initiale au sein du 3GPP, la normalisation 5G (Release-15 et Release-16) s'est principalement concentrée sur le développement de la composante 5G terrestre. À partir de la version 17, la composante RNT a commencé à être intégrée dans le système 5G. Les membres du 3GPP (représentants des secteurs verticaux, fournisseurs d'équipements et de réseaux, opérateurs de téléphonie mobile et de satellites) ont reconnu les avantages des RNT 5G, qui permettent de fournir des services au-delà de la couverture de la composante terrestre du réseau 5G.

Les RNT englobent les réseaux satellitaires fonctionnant dans les bandes de fréquences allouées aux services mobiles par satellite (SMS) ou aux services fixes par satellite (FSS). Ils s'appuient sur le système et la technologie mobiles définis par le 3GPP. Grâce à ce point commun technologique, des économies d'échelle peuvent être réalisées pour les services directs à l'appareil (D2D), l'internet des objets (IdO), le haut débit, les VSAT mobiles, les services vocaux et les services d'urgence, par exemple, au niveau des terminaux.

1.1 Direct-to-Device

Historiquement, la connectivité satellite-appareil était assurée par les réseaux satellitaires hérités, principalement à l'aide de satellites géostationnaires (GSO). Ces services étaient limités à la téléphonie vocale de base et à la messagerie textuelle, et étaient généralement proposés par des appareils spécialisés distincts des téléphones mobiles standard. En raison de la latence élevée et de la largeur de bande limitée, ces systèmes n'étaient pas adaptés aux applications en temps réel ou à forte intensité de données, et leur utilisation restait limitée à des scénarios de niche tels que les communications d'urgence.

Cependant, les progrès récents de la technologie des satellites, tant OSG que NGSO, en particulier le déploiement de la nouvelle génération de constellations de satellites en orbite basse (LEO), ont transformé le D2D en une solution pratique et évolutive. Les systèmes RNT modernes prennent désormais en charge la connectivité directe avec des smartphones non modifiés, offrant une latence plus faible, un débit de données plus élevé et une meilleure fiabilité du signal. Cette évolution permet de fournir des services tels que le texte, la voix et même des données à large bande directement depuis l'espace, étendant ainsi la couverture mobile aux zones rurales, isolées et touchées par des catastrophes, sans dépendre de l'infrastructure terrestre traditionnelle.

Un aspect remarquable des RNT modernes est la connectivité directe aux appareils (D2D), qui permet aux satellites de se connecter directement à des appareils tels que les smartphones, facilitant ainsi une communication transparente sans nécessiter d'infrastructure terrestre traditionnelle. La connectivité D2D exploite les technologies satellitaires existantes pour améliorer les capacités de communication mobile, en particulier dans les zones où les réseaux terrestres sont rares ou inexistants.

Il existe deux approches différentes pour la connectivité D2D moderne :
La première utilise le spectre déjà attribué au service mobile par satellite (SMS) et s'appuie généralement sur les spécifications de la norme 3GPP RNT permettant de mettre en œuvre des fonctions à la fois dans le réseau d'accès radio (RAN) par satellite et dans l'équipement utilisateur (UE), ce qui garantit la compatibilité et l'interopérabilité entre plusieurs fournisseurs, ainsi qu'une éventuelle intégration dans les interfaces radio terrestres et non terrestres à l'avenir. Elle utilise les attributions existantes et les protocoles et cadres normalisés, en s'appuyant sur les spécifications 3GPP RNT pour des réseaux de connectivité terrestres et satellitaires transparents dans diverses applications, sans modification supplémentaire du règlement des radiocommunications de l'UIT. Cette approche nécessite une collaboration accrue avec les fournisseurs de puces mobiles pour développer et prendre en charge les fréquences SMS pertinentes dans leur équipement utilisateur.

La deuxième approche vise à prendre en compte les combinés mobiles déjà commercialisés (c'est-à-dire les spécifications de l'UE antérieures à la version 17 du 3GPP) en utilisant le spectre attribué au service mobile (MS). Cette approche nécessite une réflexion approfondie pour garantir la compatibilité du service D2D avec le service mobile terrestre. Elle offre une solution pour compléter la couverture mobile, en comblant les lacunes de connectivité là où les réseaux traditionnels sont insuffisants, potentiellement en utilisant des combinés mobiles disponibles sur le marché. Toutefois, les exigences techniques et les cadres réglementaires de ces approches sont en cours de développement

Globalement, l'évolution du D2D ouvre la voie à un monde plus interconnecté, améliorant l'accès à des services de communication fiables dans divers environnements. En intégrant les écosystèmes satellitaires et mobiles, la connectivité D2D promet de combler d'importantes lacunes en matière de couverture (environ 2,6 milliards de personnes restent hors ligne dans le monde[1]), d'améliorer l'expérience des utilisateurs et d'élargir les débouchés commerciaux dans le domaine des télécommunications.

1.2 L'internet des objets (IdO)

L'internet des objets (IdO) est considérablement amélioré par les capacités fournies par les réseaux non terrestres (RNT), qui englobent les communications par satellite intégrées aux réseaux terrestres. Alors que le nombre d'appareils connectés devrait monter en flèche, avec des estimations dépassant les 20 milliards[2], les réseaux non terrestres sont essentiels pour

[1] https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/pages/stat/default.aspx
[2] https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/5G-fifth-generation-of-mobile-technologies.aspx

pallier les limites des réseaux terrestres, en particulier dans les zones éloignées ou mal desservies.

Les réseaux IdO terrestres et satellitaires sont tellement complémentaires que les organismes de normalisation travaillent à la création d'un écosystème IdO totalement intégré. Les avantages des débits de données élevés fournis par les réseaux terrestres et la couverture mondiale des réseaux satellitaires sont combinés pour maximiser le potentiel des déploiements IdO.

L'un des principaux avantages des réseaux terrestres est leur capacité à fournir une connectivité transparente et fiable aux appareils IdO, quel que soit leur emplacement. Ceci est particulièrement précieux pour les industries verticales telles que l'agriculture, l'élevage, le transport et la logistique, l'énergie et les services publics, la gestion de l'environnement et des catastrophes, où l'efficacité opérationnelle repose sur des données en temps réel. L'intégration de solutions IdO par satellite facilite des applications telles que l'agriculture de précision, qui nécessite une surveillance constante de l'état des cultures et de l'utilisation des ressources, permettant ainsi aux agriculteurs de prendre des décisions éclairées qui augmentent le rendement. En outre, les secteurs de la logistique et du transport se transforment grâce au suivi en temps réel des actifs et des véhicules, ce qui améliore la gestion de la chaîne d'approvisionnement et l'efficacité opérationnelle.

L'intégration des réseaux RNT et terrestres dans la norme 3GPP Rel. 17 permet des déploiements rentables dans le monde entier.

Les solutions NB-IdO (Narrowband IdO) par satellite utilisent des modules IdO de petite taille, à faible consommation et à faible coût, conçus pour un fonctionnement efficace avec les réseaux satellitaires, ce qui rend les applications plus abordables et durables.

En outre, la CEPT a introduit l'utilisation de l'IdO par satellite dans les bandes des appareils à courte portée (SRD) (également appelées bandes exemptes de licence ou de licence de classe, selon les réglementations nationales), plus précisément la bande 862-870 MHz, pour permettre la communication avec les SRD terrestres. Cette approche innovante, considérée comme IdO-RNT dans les bandes SRD, garantit l'interopérabilité avec les réseaux terrestres et prend en charge de nouveaux cas d'utilisation grâce à une couverture de réseau satellitaire transparente et robuste. La solution facilite l'exploitation efficace des systèmes satellitaires en utilisant des modules IdO à faible puissance et à faible coût, tout en améliorant l'efficacité du spectre en complétant l'utilisation du spectre terrestre. Elle est basée sur les normes et technologies terrestres existantes, employant les mêmes conditions techniques que les SRD terrestres dans le sens ascendant, ainsi que des limites de densité de puissance-flux dans la bande et hors bande dans le sens descendant pour éviter toute interférence inacceptable avec les applications et services existants.

D'autres solutions IdO par satellite utilisent des protocoles non-3GPP et fonctionnent dans les bandes SRD (par exemple, LoRa) ou dans la bande SMS 400 MHz. Ces solutions pour les

applications à faible débit de données par satellite ont été de plus en plus déployées et récemment mises à disposition sur une base commerciale mondiale.

1.3 VSAT mobile

La demande croissante de connectivité sans faille entraîne une augmentation significative du nombre de véhicules, de navires et d'avions connectés sur le marché de la mobilité. Avec l'intérêt et le succès croissants des technologies 5G-NR et RNT et des normes ouvertes 3GPP, la tendance naturelle est de faire migrer les services vers une industrie plus rentable et plus largement accessible . [2]

Actuellement, les VSAT mobiles (également connues sous le nom de stations terrestres en mouvement (ESIM)) sont introduites dans le 3GPP pour la version 19 afin de comprendre le large assortiment de performances, de facteurs de forme d'antenne et de diagrammes de rayonnement. Les grandes variations dans la construction des VSAT mobiles rendent le processus de normalisation difficile en raison du grand nombre de caractéristiques d'antenne.

Afin de fournir un modèle de base des terminaux VSAT mobiles et de rationaliser les activités de normalisation, le 3GPP évalue quatre modèles d'antennes qui reflètent les performances et les caractéristiques des VSAT mobiles terrestres, maritimes, aéronautiques et véhiculaires combinés.
Les deux premiers modèles d'antenne, à savoir 60 cm x 60 cm et 40 cm x 40 cm, sont basés sur des valeurs empiriques recueillies auprès de divers terminaux VSAT mobiles déjà déployés dans la bande Ku. En outre, les modèles d'antenne présentés pour les 20 cm x 20 cm reflètent une nouvelle approche conceptuelle qui est envisagée dans la spécification 3GPP Release 19.

Les VSAT mobiles constituent une vaste catégorie de terminaux qui sont le cheval de bataille de l'industrie des communications par satellite et fournissent une connectivité aux constellations de satellites GEO et NGSO. La version 19 du 3GPP prend des mesures importantes pour normaliser les VSAT mobiles, en se concentrant particulièrement sur les opérations en bande Ku allouées aux services par satellite. Ces efforts visent à soutenir la connectivité mobile 5G à haut débit par satellite, permettant des cas d'utilisation dynamiques de backhaul et d'accès dans les domaines aériens, maritimes et terrestres.

Ces VSAT mobiles se répartissent en trois (3) catégories principales :

1.1.1. Les VSAT portables et mobiles terrestres et les ESIM terrestres.

Les systèmes VSAT portables sont conçus pour un déploiement rapide dans des endroits éloignés ou temporaires, offrant flexibilité et facilité de transport. Ils sont idéaux pour les situations où une communication rapide et fiable est nécessaire, mais pas nécessairement en déplacement.

Les systèmes VSAT mobiles terrestres (ESIM), quant à eux, sont conçus pour les véhicules ou les unités mobiles qui ont besoin d'une communication par satellite continue pendant leurs

[2] Les analystes du marché prévoient que le nombre total de FPA expédiés dans le monde entier sera multiplié par huit entre 2023 et 2033.

déplacements. Ils sont équipés d'antennes de suivi automatique et sont conçus pour des environnements dynamiques tels que les flottes commerciales, les convois militaires ou les véhicules d'intervention d'urgence.

Les deux systèmes offrent des communications par satellite là où les réseaux terrestres traditionnels ne sont pas disponibles, mais répondent à des besoins opérationnels différents selon que l'installation est stationnaire ou mobile.

1.1.2. VSAT mobiles Maritimes

Les VSAT mobiles maritimes jouent un rôle essentiel dans la fourniture de communications par satellite fiables pour les navires en mer. Ces systèmes offrent une connectivité mondiale, des services de données à haut débit et des communications vocales et vidéo, ce qui les rend indispensables aux opérations maritimes modernes. Que ce soit pour la navigation commerciale, les yachts de plaisance, les navires militaires ou les flottes de pêche, les VSAT maritimes permettent aux navires de rester connectés, informés et en sécurité, quel que soit leur emplacement sur les océans du monde.

1.1.3. VSAT mobiles aéronautiques

Les VSAT mobiles aéronautiques fournissent des capacités de communication par satellite essentielles pour les aéronefs, permettant l'internet à haut débit, la communication sécurisée de la voix et des données, et le soutien opérationnel en temps réel. Ces systèmes sont essentiels pour l'aviation commerciale et privée, ainsi que pour les aéronefs militaires et gouvernementaux, car ils offrent de nombreux avantages tels que la connectivité mondiale, l'amélioration de l'expérience des passagers et la sécurité (à l'exclusion des opérations de sauvegarde de la vie). Le développement continu des technologies satellitaires offre des solutions plus fiables et plus abordables pour les communications aéronautiques.
Ces terminaux VSAT avancés seront constitués d'antennes à panneau plat à orientation électronique (FPA) qui assurent la connectivité avec les satellites stationnaires GEO et non stationnaires tels que les MEO et les LEO. En outre, la connectivité multiple garantit que les clients et les partenaires ne sont pas limités à une seule technologie satellitaire. Cette souplesse permet de personnaliser les services pour les adapter à un large éventail de segments de marché, de cas d'utilisation et d'applications.

1.4 Le satellite comme backhaul pour les réseaux 5G

Les systèmes satellitaires fournissent une liaison de retour 5G dans les zones où l'infrastructure de réseau terrestre (par exemple, les liaisons par fibre optique ou par micro-ondes) n'est pas réalisable ou commercialement viable. Les satellites peuvent permettre aux fournisseurs de services 5G d'étendre la couverture à large bande à des zones éloignées et difficiles d'accès. Les satellites sont donc un élément essentiel pour étendre la couverture de la 5G, en particulier dans les zones reculées.

Des développements récents au sein du 3GPP ont formellement reconnu et normalisé l'utilisation des systèmes satellitaires comme une solution viable de backhaul pour les réseaux 5G. Dans la version 18, l'"Étude sur les systèmes 5G avec liaison satellite" (TR 23.700-27)

examine les architectures exploitant les satellites GEO pour la connectivité de liaison, y compris les scénarios dans lesquels la fonction du plan utilisateur (UPF) est déployée à bord du satellite pour permettre l'acheminement du trafic localisé. En complément, la norme TS 23.501 (Release 18) stipule explicitement dans la clause 5.43 que les liaisons par satellite peuvent être utilisées dans la liaison de retour entre le RAN et le réseau central 5G. Auparavant, les exigences fondamentales pour l'intégration des satellites avaient déjà été définies dans la norme TS 22.261 (version 14), qui soulignait le rôle des réseaux non terrestres (RNT) dans l'amélioration de la couverture et de la fiabilité des applications essentielles à la mission. Dans les versions 16 à 18, le 3GPP a continué à améliorer la prise en charge des liaisons par satellite par les réseaux non terrestres, notamment en adaptant la synchronisation, la mobilité et les formes d'onde, soulignant ainsi l'importance croissante de la liaison de retour par satellite dans l'écosystème 5G.

Bien que le backhaul 5G par satellite soit confronté à des défis tels que la latence, les limitations de la bande passante et la gestion de la mobilité, l'industrie du satellite développe activement des solutions. Ces solutions comprennent des constellations LEO, des satellites à haut débit, la normalisation 5G RNT, le traitement embarqué et la technologie des terminaux intelligents pour combler ces lacunes. Ces innovations rendent le satellite de plus en plus viable, non seulement pour la couverture à distance, mais aussi pour les déploiements agiles, résilients et de grande capacité de la 5G.

1.5 Systèmes de collecte de données NGSO (DCS)

Les systèmes de collecte de données NGSO (DCS) s'appuient sur des satellites non géostationnaires pour transmettre directement aux satellites de petits paquets de données provenant de capteurs terrestres distribués. Les systèmes de collecte de données NGSO sont utilisés pour la surveillance de l'environnement, le suivi de la faune et de la flore ou les systèmes d'alerte précoce.

Le système DCS, opérationnel depuis longtemps dans le cadre de coopérations internationales, a été récemment modernisé avec de nouvelles technologies nanosatellites dédiées, améliorant la couverture mondiale, la capacité de données et l'efficacité énergétique, reflétant l'évolution en cours vers des applications à faible débit de données et soutenant les activités scientifiques et environnementales dans la bande EESS 401 MHz.

1.6 Satellite Défini par logiciel

Les satellites définis par logiciel (SDS) constituent une avancée révolutionnaire dans la technologie des satellites qui introduit la flexibilité et la programmabilité dans les réseaux de télécommunications traditionnels. Cette innovation simplifie considérablement la gestion, améliore l'efficacité de l'utilisation des ressources et réduit les coûts d'exploitation. En s'orientant vers un écosystème de réseau mondial qui intègre des satellites, des modems et des antennes définis par logiciel, ainsi que l'interopérabilité nécessaire, l'industrie des satellites est prête à réaliser le plein potentiel des applications futures et des demandes de connectivité.

Ces satellites logiciels présentent des caractéristiques remarquables, telles qu'une connectivité supérieure où la forme des faisceaux et l'allocation de puissance peuvent être adaptées de manière dynamique pour optimiser la couverture et les performances de la liaison. Ils offrent également une disponibilité de capacité flexible avec une allocation dynamique de la bande passante qui s'ajuste en fonction de la demande, ce qui permet aux satellites de modifier leur capacité pour s'aligner sur les besoins de trafic des utilisateurs. En outre, les SDS permettent une mise en réseau transparente de bout en bout grâce à des interactions logicielles dynamiques avec les terminaux des utilisateurs et les réseaux centraux, ce qui facilite l'orchestration complète des services.

Le développement d'un réseau unifié qui utilise un système multi-orbite, multicouche et multi-bande, soutenu par des terminaux terrestres intelligents, libère des capacités significatives pour les communications par satellite. En combinant des satellites géostationnaires et non géostationnaires, l'industrie vise à optimiser l'acheminement du trafic sur des réseaux multi-orbites. Cette approche exploite efficacement les caractéristiques uniques des différentes orbites de satellites en termes de couverture, de débit et de facilité d'exploitation, ce qui permet d'enrichir la qualité du service et de répondre plus efficacement aux besoins spécifiques des utilisateurs. Ainsi, les satellites définis par logiciel ouvrent la voie à une nouvelle ère de systèmes de communication par satellite évolutifs, rentables et fiables qui promettent d'améliorer la connectivité mondiale.

3. SATELLITES MULTI-ORBITES

Les solutions multi-orbites dans le domaine des communications par satellite font référence à l'intégration de satellites opérant dans différentes configurations orbitales, telles que l'orbite géostationnaire (GSO) et l'orbite non géostationnaire (NGSO). Cette approche tire parti des caractéristiques et avantages uniques associés à chaque type d'orbite pour optimiser la couverture, le débit et le temps de latence des satellites, ce qui permet d'améliorer la qualité des services de communication offerts aux utilisateurs. L'objectif des solutions multi-orbites est de répondre aux diverses exigences de niveau de service fixées par les clients dans une gamme variée d'applications et de lieux géographiques.

En employant une stratégie multi-orbite, les opérateurs de satellites peuvent acheminer efficacement le trafic en fonction des conditions en temps réel et des demandes des utilisateurs. La combinaison de ces orbites permet une transmission de données plus souple et plus efficace, assurant une connectivité transparente dans différents environnements, qu'il s'agisse de zones urbaines, rurales ou isolées. Cette capacité est particulièrement bénéfique pour les entreprises, les gouvernements et les utilisateurs individuels qui ont besoin de services de communication fiables et de grande capacité en temps réel.

En outre, les réseaux multi-orbites facilitent les applications avancées telles que l'observation de la terre et la télédétection. En connectant des satellites à différentes altitudes et sur différentes orbites, les opérateurs peuvent relayer de grands volumes de données plus efficacement, fournissant ainsi des informations opportunes essentielles pour divers secteurs,

notamment l'agriculture, la réponse aux catastrophes et la surveillance de l'environnement. Cette intégration permet non seulement d'améliorer la connectivité, mais joue également un rôle essentiel pour répondre à la demande croissante de services de données améliorés et d'inclusion globale dans le paysage numérique. Dans l'ensemble, les solutions multi-orbites remodèlent le secteur des communications par satellite, en veillant à ce que les divers besoins de communication soient satisfaits tout en faisant progresser la durabilité et l'efficacité des réseaux satellitaires.

En résumé, la connectivité multi-orbite permet :

1) de basculer ou de combiner en toute transparence les réseaux GEO, MEO et LEO en fonction des besoins de capacité des applications individuelles.
2) GEO : Large couverture, capacité de bande passante, stabilité, sécurité et capacités de localisation précise des réseaux GEO.

3) NGSO (LEO/MEO) : connectivité à faible latence et capacité de débordement des réseaux NGSO pour les applications qui nécessitent une qualité d'expérience élevée, même pendant les pics de demande.

4) Des communications par satellite plus accessibles, plus abordables et plus polyvalentes.

4. INNOVATION DANS LE SEGMENT TERRESTRE

Le segment terrestre du système satellitaire évolue avec la nature changeante des constellations de satellites OSG et OSNG. Avec la prolifération des constellations NGSO et des satellites sur des orbites inclinées, le besoin d'antennes qui suivent les satellites est devenu essentiel. Ces antennes peuvent être des antennes paraboliques traditionnelles, fonctionnant souvent par paires pour assurer une connexion "make before Image by Hughesbreak", ou des antennes à panneau plat (FPA). Une autre tendance de l'industrie est de s'orienter vers un écosystème terrestre agnostique où l'interopérabilité est essentielle. L'initiative DIFI (Interopérabilité des fréquences intermédiaires numériques) utilise une norme ANSI existante comme moyen d'y parvenir en présentant le signal pour un traitement ultérieur sous une forme générique. Cette norme est utilisée dans les architectures de concentrateurs et des initiatives ont été prises pour qu'elle soit plus largement mise en œuvre dans les terminaux.

La taille, le poids, la consommation d'énergie et le coût des terminaux d'utilisateurs de satellites ont été réduits et offrent un large éventail de solutions à l'utilisateur final. Par exemple, les améliorations significatives apportées aux antennes de petite taille ont permis de créer des terminaux plus portables, tout en offrant de meilleures performances que les modèles de la génération précédente. Ces améliorations facilitent le déploiement à plus grande échelle de terminaux d'utilisateurs qui permettent une plus grande connectivité au réseau mondial.

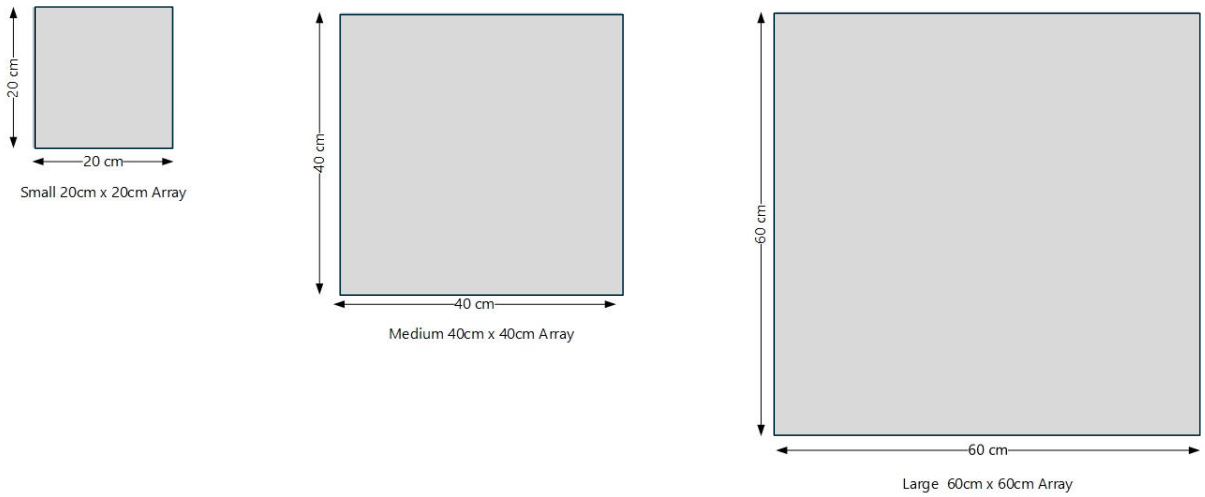

Figure1 : Ces figures illustrent les FPA théoriques utilisés dans l'industrie des télécommunications par satellite.

5. LIAISONS INTER-SATELLITES

Les liaisons inter satellites (LIS) sont une technologie innovante qui permet une communication directe entre les satellites en orbite. Ces liaisons facilitent le transfert de données en temps réel, ce qui est particulièrement utile pour les constellations de satellites LEO. Traditionnellement, les satellites LEO ne pouvaient communiquer avec les stations terrestres que dans une vue limitée de la Terre. Toutefois, grâce à la mise en œuvre des ISL, les données peuvent être relayées entre les satellites, ce qui permet d'améliorer la connectivité et l'efficacité du réseau de communication.

Cette capacité est également cruciale pour des applications telles que l'observation de la Terre, où les satellites peuvent transmettre des images et des données de haute qualité au sol en temps réel par l'intermédiaire de satellites situés sur d'autres orbites, même lorsqu'ils ne sont pas en ligne de vue directe avec une station terrestre.

Les progrès de la technologie des communications optiques jouent un rôle important dans la transformation des liaisons inter satellites en fournissant des connexions à haut débit qui améliorent l'efficacité et la sécurité des transmissions de données. Les liaisons optiques inter satellites offrent une plus grande résilience que les communications traditionnelles par radiofréquence, ce qui réduit les interférences et améliore l'intégrité des données. Au fur et à mesure que ces technologies optiques seront adoptées et que leurs coûts continueront à diminuer, elles devraient être à l'origine de nouvelles innovations dans le domaine des communications par satellite, en élargissant le nombre d'applications potentielles et en augmentant la capacité globale.

Les capacités offertes par les LSI sont essentielles pour répondre aux demandes croissantes de divers secteurs, allant des télécommunications aux interventions en cas de catastrophe et aux services d'urgence. Elles permettent un plus large éventail de services, tels que l'allocation en temps réel de la bande passante pour le trafic IdO et l'amélioration de la transmission des données de prévisions météorologiques. Dans l'ensemble, les liaisons inter satellites représentent un bond en avant significatif dans les technologies de communication par satellite, permettant des réseaux plus interconnectés et plus résilients, capables de répondre à la demande mondiale croissante de communications à haute capacité.

6. ENTRETIEN EN ORBITE ET PROLONGATION DE LA DURÉE DE VIE

L'extension de la durée de vie et l'entretien en orbite sont des éléments essentiels de l'exploitation moderne des satellites, qui visent à améliorer la longévité et la fonctionnalité des satellites au-delà de leur durée de vie prévue à l'origine. Les services d'extension de la durée de vie permettent aux opérateurs de satellites de réutiliser les actifs existants plutôt que de les remplacer, ce qui est particulièrement important compte tenu des coûts élevés associés au déploiement de nouveaux satellites. En se concentrant sur l'entretien en orbite - la réparation, la mise à niveau ou le ravitaillement des satellites - les opérateurs peuvent maximiser leurs investissements et assurer la continuité de la fourniture de services sans avoir à supporter les coûts importants du remplacement.

Les avantages de l'entretien en orbite ne se limitent pas à de simples économies. Ces services peuvent améliorer la fiabilité des satellites, en veillant à ce qu'ils continuent à fonctionner même après avoir épuisé leur carburant ou subi des défaillances de sous-systèmes. Par exemple, grâce aux initiatives de prolongation de la durée de vie, les satellites peuvent rester opérationnels plus longtemps, et les projections suggèrent que les services en orbite pourraient générer plus de 4 milliards de dollars de revenus d'ici 2028[3] . Le déploiement des satellites GEO coûte souvent plus de 200 millions de dollars, ce qui souligne la valeur de l'entretien, de la réparation ou de la mise à niveau de ces satellites plutôt que de leur remplacement pur et simple.

Cette capacité à maintenir et à prolonger la durée de vie opérationnelle permet d'éviter d'éventuelles interruptions de service dans des secteurs critiques tels que les télécommunications, la défense et les interventions en cas de catastrophe.
En outre, à mesure que l'industrie des satellites continue d'évoluer, divers nouveaux services en orbite sont développés, de la remise en état à l'élimination des débris, ce qui indique une évolution vers une utilisation plus sûre et plus durable de l'environnement orbital. Cette approche proactive de la gestion des satellites vise à maintenir les autoroutes orbitales sûres et sécurisées pour le développement économique, et à soutenir en fin de compte un écosystème satellitaire robuste et résilient.

7. INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE

L'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique jouent un rôle transformateur dans le domaine des communications par satellite, en améliorant considérablement l'efficacité, la fiabilité et la sécurité des opérations satellitaires. En optimisant divers aspects opérationnels, l'IA peut améliorer la performance du réseau et permettre une maintenance prédictive, ce qui est crucial pour prévenir les défaillances du système. Par exemple, l'utilisation d'algorithmes d'IA pour l'analyse des données permet aux opérateurs d'identifier des modèles et des anomalies dans les données de performance, ce qui facilite les interventions opportunes avant que les problèmes potentiels ne s'aggravent.

En outre, les capacités de l'IA s'étendent à l'allocation dynamique des ressources, en particulier en ce qui concerne la gestion du spectre radioélectrique. Grâce aux techniques de ML, les systèmes satellitaires peuvent mieux détecter et atténuer les interférences,

[3] Astroscale U.S. entre sur le marché de l'extension de la durée de vie des satellites GEO - Astroscale

garantissant ainsi des canaux de communication plus clairs. Cela permet non seulement d'améliorer l'expérience des utilisateurs, mais aussi de maximiser l'utilisation de la bande passante sur les réseaux satellitaires. Alors que la demande de services de communication de plus grande capacité et plus fiables augmente, l'intégration de l'IA et de la ML dans les opérations satellitaires devient essentielle pour maintenir des avantages concurrentiels dans le paysage des télécommunications en constante évolution.

L'avènement des technologies d'IA et de ML ouvre également la voie à des applications innovantes dans les services par satellite, telles que le routage intelligent pour la transmission de données et des mesures de sécurité renforcées pour se protéger contre les cybermenaces Ces avancées sont particulièrement vitales à mesure que les satellites deviennent de plus en plus partie intégrante du soutien aux technologies émergentes, y compris l'Internet des objets (IdO) et la prochaine génération de réseaux mobiles tels que la 5G et la 6G. La convergence de l'IA et de la technologie satellitaire est sur le point non seulement d'optimiser les opérations actuelles, mais aussi de définir de nouveaux paradigmes en matière de connectivité et de capacités de communication à l'échelle mondiale.

8. CONCLUSION

L'évolution dynamique des communications par satellite transforme la connectivité mondiale. Les développements en cours décrits dans le présent rapport, notamment les réseaux satellitaires multi-orbites, les liaisons inter satellites et l'intégration de réseaux non terrestres, illustrent l'engagement de l'industrie à étendre et à améliorer les solutions de connectivité. Ces progrès sont essentiels pour répondre à la demande croissante de services de communication fiables, sécurisés et de grande capacité. Le déploiement de ces technologies de pointe est à l'origine d'une nouvelle ère de communications par satellite qui réduit la fracture numérique et favorise l'inclusion mondiale.

La convergence de ces technologies innovantes permet à l'industrie des communications par satellite de jouer un rôle crucial dans l'avenir de la connectivité mondiale, en garantissant un avenir numérique inclusif pour tous. Cette transformation en cours souligne l'engagement de l'industrie à créer un monde plus connecté et plus sûr.

Les implications de ces développements pour les États membres de l'UAT sont profondes. Ces technologies de transformation offrent aux États membres de l'UAT la possibilité d'atteindre une couverture universelle à large bande en complément des réseaux terrestres.

En outre, l'intégration de systèmes multi-orbites, fonctionnant dans différentes configurations orbitales, avec les réseaux terrestres, permet la redondance dans le déploiement de l'infrastructure nationale, améliorant ainsi la résilience du réseau.

Alors que l'industrie des satellites continue d'évoluer, il est important pour les États membres de l'UAT d'exploiter de manière proactive ces technologies émergentes, de mettre à jour et d'harmoniser les cadres politiques afin de permettre l'utilisation de ces solutions innovantes. Ces avancées technologiques peuvent être mises au service du développement durable, de l'autonomisation économique et de la création d'une économie numérique inclusive qui garantit qu'aucune communauté n'est laissée pour compte.

9. RÉFÉRENCES

[1] Astroscale. (n.d.). *ELSA-d mission*. https://astroscale.com/elsa-d/

[2] CNES. (n.d.). *Système de collecte de données Argos.* https://cnes.fr/projets/argos

[3] EchoStar. (2024, 15 juillet). *EchoStar lance un laboratoire de développement Open RAN*. Satellite Today. https://www.satellitetoday.com/technology/2024/07/15/echostar-launches-open-ran-development-lab/

[4] Eutelsat. (n.d.). *Eutelsat Quantum*. https://www.eutelsat.com/en/satellites/eutelsat-48-east.html

[5] Hughes. (n.d.). *Jupiter system satellite ground systems.* https://www.hughes.com/what-we-offer/satellite-ground-systems/jupiter-system

[6] Intelsat. (n.d.). *AI-optimized satellite network performance.* https://www.intelsat.com/resources/case-studies/detasads-innovation-at-the-connected-edge/

[7] Intelsat. (n.d.). *Intelsat progresse vers une certification complète pour les services 5G à travers les réseaux satellitaires et terrestres.* https://www.intelsat.com/resources/blog/intelsat-advances-towards-full-certification-for-5g-services-across-satellite-and-terrestrial-networks/

[8] Union internationale des télécommunications. (n.d.). *5G : Cinquième génération de technologies mobiles.* https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/5G-fifth-generation-of-mobile-technologies.aspx

[9] Kinéis. (n.d.). *Connectivité mondiale IdO et AIS.* https://www.kineis.com/en/spatial-IdO-connectivity/

[10] Association SMS. (n.d.). *À propos de MSSA.* https://www.mss-association.org/about-mssa

[11] NOAA. (n.d.). *Système de satellites Argos.* https://www.noaasis.noaa.gov/POLAR/ARGOS/argos.html

[12] Plan-S. (n.d.). *IoT* **connectivity.** https://www.plan.space/iot

[13] Rivada Space Networks. (n.d.). *Connectivité mondiale sécurisée.* https://www.rivadaspace.com/

[14] Sateliot. (n.d.). *Connectivité IoT mondiale via des nanosatellites.* https://www.sateliot.space/

[15] SES. (n.d.). *Constellation O3b mPOWER.* https://www.ses.com/our-coverage/o3b-mpower

[16] Viasat. (n.d.). *Message reçu : Viasat poursuit son programme de démonstration directe avec une première démonstration aux Émirats arabes unis.* https://news.viasat.com/newsroom/press-releases/message-received-viasat-continues-direct-to-device-showcase-with-first-demonstration-in-united-arab-emirates

10. ABBREVIATIONS

3GPP - Projet de partenariat de troisième génération
AI - Intelligence artificielle
ANSI - American National Standards Institute (Institut national américain de normalisation)
UAT - Union africaine des télécommunications
BSS - Broadcasting Satellite Services (services de radiodiffusion par satellite)
CEPT - Conférence européenne des administrations des postes et des télécommunications
D2D - Direct-to-Device
DCS - Systèmes de collecte de données
DIFI - Interopérabilité des fréquences intermédiaires numériques
EESS - Service d'exploration de la Terre par satellite (SETS)
ESIM - Earth Stations in Motion (Stations terrestres en mouvement)
FPA - Antennes à panneau plat
SFS - Services fixes par satellite
GEO - Orbite terrestre géostationnaire
GSO - Orbite géostationnaire
GSOA - Global Satellite Operators Association (Association mondiale des opérateurs de satellites)
HEO - Highly Elliptical Orbit (orbite hautement elliptique)
HAPS - High Altitude Platform Station (station de plate-forme à haute altitude)
IoT - Internet des objets (IdO)
ISL - Liaisons inter-satellites (LIS)
UIT - Union Internationale des Télécommunications
LEO - Low Earth Orbit (orbite terrestre basse)
MEO - Orbite terrestre moyenne
ML - Machine Learning (apprentissage automatique)
MNO - Opérateur de réseau mobile (ORM)
MS - Mobile Service (service mobile)
SMS - Mobile Satellite Services (services mobiles par satellite)
NB-IoT - Internet des objets à bande étroite
NGSO - Orbite non géostationnaire
NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration (Administration nationale des océans et de l'atmosphère)
RNT - Non-Terrestrial Network (réseau non terrestre RNT)
O-RAN - Open Radio Access Network (réseau ouvert d'accès radio)
PNT - Positionnement, navigation et synchronisation
QKD - Quantum Key Distribution (distribution de clés quantiques)
QoE - Qualité d'expérience
RAN - Réseau d'accès radio
RIC - Contrôleur intelligent de réseau d'accès radio
SCADA - Contrôle de surveillance et acquisition de données
SDS - Satellites définis par logiciel
SRD - Short Range Device (dispositif à courte portée)
TN - Réseau terrestre
UAS - Uncrewed Aircraft Systems (systèmes d'aéronefs non embarqués)
UE - User Equipment (équipement de l'utilisateur)
UPF - User Plane Function (fonction du plan utilisateur)
VSAT - Very Small Aperture Terminal (terminal à très petite ouverture)

African Telecommunications Union

Westlands Office Park, Acacia House, 1st Floor

P. O Box 35282 – 00200 Nairobi, Kenya

Tel: +254 722 203132

Email: sg@atuuat.africa

Website: www.atuuat.africa

*****